

张嘉敏, 杨绍富. 天山中段分量式钻孔应变仪观测资料可靠性论证 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 108-115. [ZHANG Jiamin, YANG Shaofu. Reliability Demonstration of Observation Data of Component Borehole Strain Meter in the Middle Tianshan [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 108-115]

天山中段分量式钻孔应变仪观测资料可靠性论证

张嘉敏, 杨绍富

(新疆维吾尔自治区地震局库尔勒地震台, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 利用潮汐因子内精度、相对标定自检内精度、面应变相关系数等指标, 综合对比分析天山中段 8 个台站分量式钻孔应变仪观测资料的质量。认为各台资料均达到了国家应变台站的观测标准, 数据质量可靠, 其中观测精度较高的有巴仑、榆树沟、库米什和石场等台。

关键字: 分量式钻孔应变仪; 自检内精度; 相关系数; 可靠性

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-00108-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.015

Reliability Demonstration of Observation Data of Component Borehole Strain Meter in the Middle Tianshan

ZHANG Jiamin, YANG Shaofu

(Korla Seismic Station, Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla 841000, China)

Abstract: By using the tidal factor internal accuracy, relative calibration internal accuracy, surface strain correlation coefficient and other indicators, the paper comprehensively compares and analyzes the quality of observation data of component borehole strain meter at 8 stations in the middle Tianshan. The results show that the data of each station has reached the observation standard of the national strain station, and the data quality is reliable. Among them, Balun, Yushugou, Kumishi and Shichang stations have higher observation accuracy. Part of the stations have the high precision such as Baluntai, Yushugou, Kumishi and Shichang.

Keywords: Component borehole strain; Self-test accuracy; Correlation coefficient; Reliability

0 引言

钻孔应变仪是研究地壳变形和地应力场变化的重要观测仪器。RZB 系列分量应变仪是由中国地震局地壳应力研究所研制的, 观测精度达到 10^{-10} , 能够清楚地记录到固体潮。方向性是 RZB 分量应变仪的最重要的特点^[1]。对分量式

钻孔应变观测资料的研究和应用, 很多学者也做了大量的工作。邱泽华等提出四分量钻孔应变观测的相对标定和绝对标定^[2]; 唐磊等提出钻孔应变观测数据不同时间尺度的自检方法^[3]; 吴立恒等通过分析参考元件的稳定性、固体潮潮汐因子、四个元件面应变相关性等方面, 分析了北京百善 RZB 深井钻孔应变观测系统的可

收稿日期: 2019-06-02

基金项目: 中国地震局“三结合”课题 (3JH-201901036)

作者简介: 张嘉敏 (1985-), 女, 助理工程师, 主要从事地震前兆监测工作。

E-mail: 150226570@qq.com

可靠性^[4]；陈涛等对三峡重庆地区6个测点的四分量钻孔应变资料进行可靠性分析^[5]；杨绍富对新疆天山中段3套钻孔应变资料进行了比较全面的可靠性分析^[6]，为进一步丰富和完善天山中段其他测点钻孔应变仪观测资料的研究成果，本文选取天山中段8套钻孔应变仪的观测数据，运用前人在钻孔应变观测资料自检、可靠性分析方面的研究方法进行分析和论证这8套分量钻孔应变观测资料的可靠性。

1 台站概况及仪器简介

中国地震局地壳应力研究所援疆项目一天

山中段前兆台网建设项目，于2013年11月开始实施安装架设，先后在榆树沟台、库米什台、呼图壁雀儿沟台、独山子巴音沟台、焉耆县小泉沟台、和静县巴仑台、新源台以及石河子石场台架设安装了8套RZB-2分量式钻孔应变仪，台站分布见图1。2017年3月通过了专家组和地壳所的正式验收，经过一段时间的试运行后正式投入观测，目前各测点观测数据均已稳定，能够产生连续、可靠的观测数据，大部分测点观测仪器均累积了2年以上的观测资料，并且部分观测资料在近些年周边几次中强震前显示出较好的震兆异常。各台站钻孔应变情况见表1。

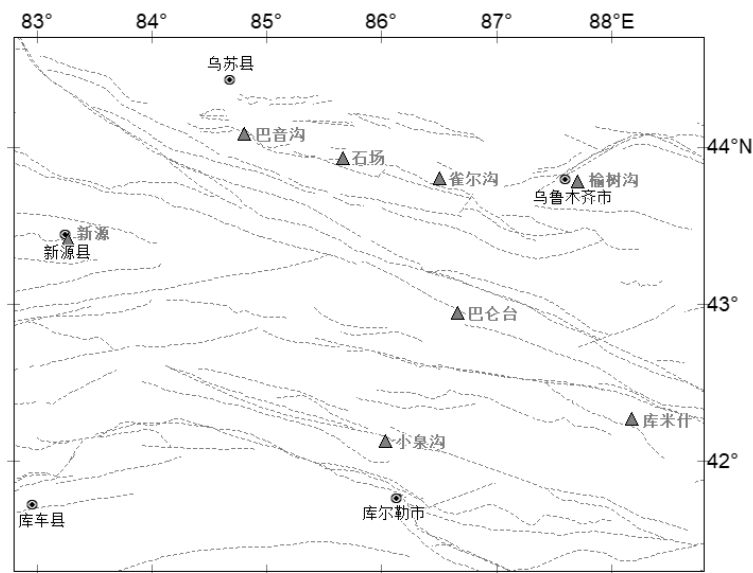


图1 天山中段各台站分布图
Fig.1 Distribution map of stations in the middle Tianshan

RZB-II型四分量钻孔应变仪的探头是一个密封的圆柱形钢筒，其内安放了四个分量元件，互成45°排列，用以测量钢筒内径的相对变化，能记录到清晰的固体潮汐和地壳应变变化^[7]。钻

孔深度一般为几十米到一百余米，探头放置在井底，并用特制水泥固结，保证钢筒与周围岩石良好耦合。

表1 天山中段分量应变台站基本情况
Table 1 Basic situation of component strain stations in the middle Tianshan

台站	所处断裂	台基地质概况	钻孔深度/m	1# 元件方位角
库米什	哈拉毛墩断裂	砖红色花岗岩，硅质胶结	125	N65°W
小泉沟	库尔勒断裂	灰白色花岗岩，结构密实	120	N6°E
巴仑台	乌鲁斯台断裂	较完整的青灰色石英砂岩，质地坚硬	157	N44°E
榆树沟	西山断裂	三迭纪砂岩、泥岩，岩石破碎	35	N49°E
雀儿沟	准格尔南缘断裂	白垩系红色砂岩，岩石很完整	132	N4°E
石场	准格尔南缘断裂	侏罗系砂岩和砾岩互层，岩石完整性较好	64.8	N10°W
巴音沟	准格尔南缘断裂	石炭系凝灰岩和砂岩，岩石完整性一般	102	N4°E
新源	巴音布鲁克断裂	紫红色安山岩	110	N76°W

2 数据资料分析

本文选取 8 个台站连续观测数据，计算潮汐因子内精度、相对标定自检内精度和面应变相关系数，对资料进行可靠性论证。

2.1 潮汐因子内精度

以 M_2 波振幅因子的相对中误差为指标来评定应变观测数据的质量称为内精度。对一个月尺度的应变观测数据进行 Venedikov 调和分
析，I 类应变台站要求相对中误差 $< 0.05^{[8]}$ 。表 2 分别计算 8 个台 2018 年 2 月至 4 月两组面应变的潮汐因子内精度。

表 2 四分量钻孔应变观测数据潮汐因子内精度
Table 2 The tidal factor internal accuracy of four-component borehole strain observation data

台站名称	资料选取时段 / (年 - 月)	两组面应变		内精度
		面应变 1 (S1+3)	面应变 2 (S2+4)	
库米什	2018-02	0.0218	0.0160	0.0189
	2018-03	0.0192	0.0172	0.0182
	2018-04	0.0254	0.0206	0.0230
小泉沟	2018-02	0.0074	0.0279	0.0177
	2018-03	0.0150	0.0893	0.0522
	2018-04	0.0180	0.0279	0.0230
巴仑台	2018-02	0.0033	0.0031	0.0032
	2018-03	0.0077	0.0083	0.0080
	2018-04	0.0029	0.0028	0.0029
榆树沟	2018-02	0.0107	0.0219	0.0163
	2018-03	0.0147	0.0320	0.0234
	2018-04	0.0191	0.0380	0.0286
雀儿沟	2018-02	0.0102	0.0054	0.0078
	2018-03	0.0190	0.0135	0.0163
	2018-04	0.0122	0.0054	0.0088
石 场	2018-02	0.0021	0.0064	0.0043
	2018-03	0.0039	0.0083	0.0061
	2018-04	0.0040	0.0061	0.0051
巴音沟	2018-02	0.0120	0.0115	0.0118
	2018-03	0.0091	0.0084	0.0088
	2018-04	0.0090	0.0095	0.0093
新 源	2018-02	0.1713	0.0405	0.1059
	2018-03	0.8581	0.0640	0.4611
	2018-04	0.1363	0.0354	0.0859

从表 2 计算结果可以看出，巴仑台的观测数据精度最高，其次是石场台和巴音沟台，之后是雀儿沟台、库米什台、榆树沟台、小泉沟台，新源台的观测精度最低，从日常观测曲线也能看出巴仑台潮汐曲线形态较为明显，而新源台观测数据潮汐形态就没有那么显著（图 2）。除了小泉沟台 2018 年 3 月和新源台观测精度低于 0.05 外，其余台站的观测数据精度均达到了 I 类应变台站的观测要求。从各台站分布的情况来看，观测数据精度较高的台站位于天山地震带的中部，而偏东或偏西的台站观测精度则

偏低，因此认为观测数据精度与所选台址和基岩性质有较大关系。新源台 NS 分量和 EW 分量 2018 年 1-4 月出现持续时段较为固定的曲线转折变化（图 3），经向台站相关负责人了解，台站周边无明显干扰，工作人员初步分析认为可能是震前的中短期异常，这也可能是导致数据观测数据潮汐精度较低的原因。从单个台观测数据精度变化情况来看，小泉沟台、巴仑台、雀儿沟台、新源台都出现 2018 年 3 月精度降低的情况，分析认为可能是这四个台站受气温影响较大。

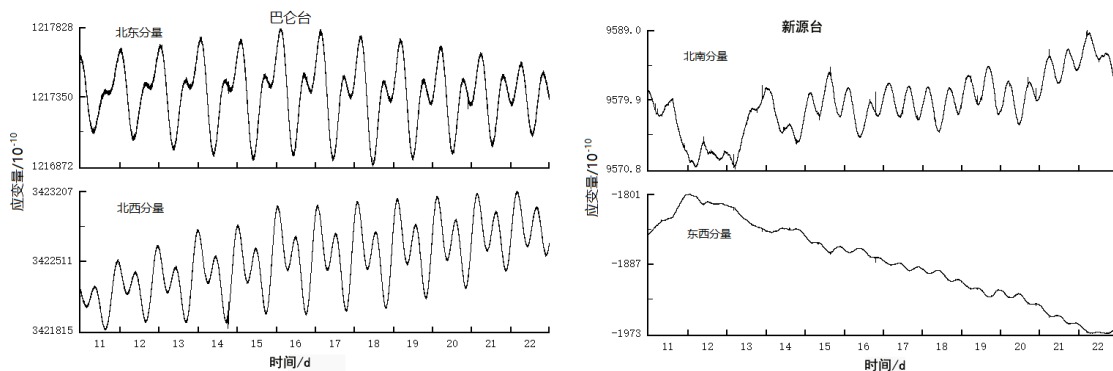


图2 巴仑台和新源观测数据曲线形态对比 (2018-01-11-2018-01-22)

Fig.2 Comparison of the curve shape of the observation data of Balen station and Xinyuan (2018-01-2018-05)

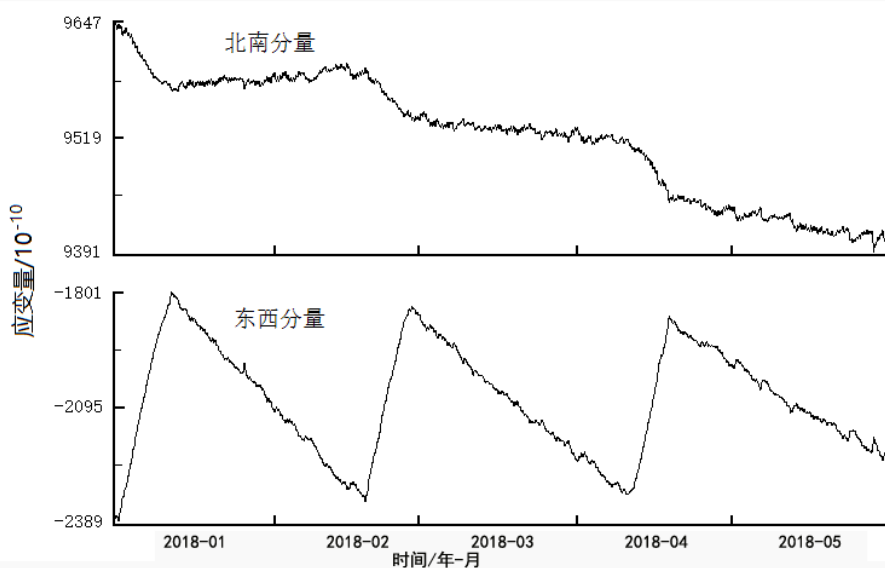


图3 新源台两分量钻孔应变观测数据曲线 (2018-01-2018-05)

Fig.3 Curves of borehole strain observation data of Xinyuan station (2018-01-2018-05)

潮汐因子内精度并不是分量式钻孔应变观测资料质量评定的唯一指标,根据四分量钻孔应变观测的特性,相关科研人员提出了相对标定自检内精度指标^[9]。

2.2 相对标定自检内精度计算

由于应变仪探头在井下安装时存在耦合效应的不均一性,各分量应变的原始观测数据与实际值之间可能有一定的偏差,会影响到数据的可靠性,故需要对观测值进行实地相对标定和换算^[2]。

邱泽华等^[2]提出钻孔四分量应变观测实地标定的方法,根据一定的假设条件对元件观测值进行校正。令

$$S_i = k_i s_i \quad i = (1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

其中 S_i 为各元件的观测值,根据四分量钻孔应变特性,应该有:

$$S_1 + S_3 = S_2 + S_4 \quad (2)$$

公式(2)即为应变仪的“自检”条件,表明理想情况下记录到的两组面应变应相同,该式能较好地说明探头与周围基岩的耦合状况^[10]。将实际观测值代入式(2),设定任意一个 $k_i=1$,可以反演得到其他 k_i 。分别给定不同 $k_i=1$,可以得到4组 k_i ($i=1, 2, 3, 4$),取其平均值作为最终反演结果。 k_i 都应在1附近取值,特别是探头与围岩的耦合处于理想状况时,所有 k_i 都等于1。我们称对 k_i 的这种反演为实地相对标定,称 k_i 为相对校正系数。 k_i 越接近于1,表明观测数据质量越高。单从相对校正系数来看,4个元件的校正系数可能都接近于1,也可能部分元件的校正系数接近于1,如果特定区域内台站分布较多,便不能更好地判定哪个台站的观测质量更优,因此唐磊等提出了自检内精度的计算,

仿照潮汐因子内精度的概念,由4个元件的标定系数求出均值和偏差^[10]。定义:

$$\alpha = \frac{S}{R} \quad (4)$$

其中, α 为自检内精度; S 是偏差,为了达到更为客观的评价结果,这里的偏差是4个元件的校正系数相对于1的偏差; R 为4个元件相对校正系数均值的绝对值。公式为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (k_i - 1)^2}{4}} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

利用该指标对观测数据进行质量评价时,自检内精度 < 0.2 为优等精度。自检内精度 α 越小,观测数据质量越高。

2.3 面应变相关系数

根据钻孔四分量观测的自洽方程,可以得到面应变1、面应变2,直接通过原始数据得到

一组面应变。将原始数据进行相对标定后也可以得到一组面应变,每组面应变都可计算一个相关系数:

$$r = \frac{\sum S_{13} S_{24} - \frac{\sum S_{13} \sum S_{24}}{N}}{\sqrt{(\sum S_{13}^2 - \frac{(\sum S_{13})^2}{N})(\sum S_{24}^2 - \frac{(\sum S_{24})^2}{N})}} \quad (5)$$

其中, r 表示相关系数; S_{13} 表示“分量1+分量3”,即面应变1; S_{24} 表示“分量2+分量4”,即面应变2; N 表示数据个数。利用该指标对观测数据进行质量评价时,两组面应变相关系数越接近1,观测数据质量越高^[9]。

选取天山中段8个台分量应变观测2018年2月至4月整点值数据,计算自检内精度和面应变相关系数,计算结果见表3。

表3 天山中段分量钻孔应变观测数据质量评价结果

Table 3 Quality evaluation results of component borehole strain observation data in the middle Tianshan

台站名称	资料时段 / 年 - 月	元件相对校正系数					偏差 S	自检内精度 α	面应变相关系数	
		k_1	k_2	k_3	k_4	平均值			校正前	校正后
库米什	2018-02	1.1035	0.9109	0.8867	0.9921	0.9733	0.0888	0.0912	0.9931	0.9947
	2018-03	1.1714	0.9134	0.8501	1.0155	0.9876	0.1221	0.1236	0.9951	0.9971
	2018-04	1.1304	0.9255	0.8579	1.0170	0.9827	0.1037	0.1056	0.9970	0.9980
小泉沟	2018-02	1.3160	1.2488	1.2091	0.4509	1.0562	0.3560	0.3371	0.9043	0.9697
	2018-03	1.1322	1.0158	1.1897	0.4239	0.9404	0.3105	0.3302	0.8904	0.9358
	2018-04	1.1421	1.1129	0.8343	0.7355	0.9562	0.1805	0.1888	0.9522	0.9765
巴仑台	2018-02	1.0099	1.0371	1.0172	0.9282	0.9981	0.0416	0.0417	0.9977	0.9989
	2018-03	1.0059	1.0331	1.0175	0.9328	0.9973	0.0386	0.0387	0.9977	0.9988
	2018-04	1.0078	1.0320	1.0265	0.9274	0.9984	0.0420	0.0421	0.9978	0.9990
榆树沟	2018-02	1.0486	1.0728	1.1694	0.7659	1.0142	0.1510	0.1489	0.9581	0.9994
	2018-03	1.0859	1.1181	1.1090	0.7523	1.0163	0.1538	0.1513	0.9986	0.9999
	2018-04	1.0359	1.0604	1.2092	0.7756	1.0203	0.1574	0.1542	0.9796	0.9997
雀儿沟	2018-02	0.2500	0.8611	0.3117	-0.2560	0.2917	0.8113	2.7814	0.8939	0.9207
	2018-03	0.2499	-6.2535	-1.1579	3.2775	-0.9710	3.9692	-4.0878	0.8517	0.9896
	2018-04	0.2500	10.3338	2.2140	-4.9774	1.9551	5.5876	2.8580	0.9315	0.9978
石 场	2018-02	0.8205	0.9283	1.1916	1.1323	1.0182	0.1513	0.1486	0.9757	0.9985
	2018-03	0.8112	0.9045	1.1858	1.1371	1.0097	0.1566	0.1551	0.9682	0.9948
	2018-04	0.8200	0.9295	1.2017	1.1258	1.0193	0.1532	0.1503	0.9756	0.9987
巴音沟	2018-02	0.7493	0.9418	0.7273	0.8438	0.8156	0.2031	0.2490	0.8904	0.8924
	2018-03	1.0917	0.8563	1.0742	0.9697	0.9980	0.0942	0.0944	0.9932	0.9952
	2018-04	1.0849	0.8683	1.0609	0.9693	0.9959	0.0854	0.0858	0.9944	0.9956
新 源	2018-02	3.8903	4.1315	0.3067	1.7763	2.5262	2.1934	0.8682	-0.7642	0.9548
	2018-03	1.8036	1.1407	0.3573	0.9925	1.0735	0.5193	0.4837	0.0933	0.9288
	2018-04	4.2103	2.8948	0.3203	2.3042	2.4324	2.0037	0.8238	-0.5559	0.9708

从表 3 的计算结果可以看出：

(1) 从自检内精度的统计结果及各台站排序(图 4)来看,巴仑台精度最高,其次是巴音沟台(2 月数据精度偏低的原因是因为仪器故障造成缺数导致的),之后是库米什台,榆树沟台和石场台的数据精度基本相当,处于中等水平;小泉沟、新源、雀儿沟三个台的数据精度偏低,均低于优等数据精度的标准。其中新源台和雀儿沟台的四个元件相对校正系数与 1 的偏差较大,因此计算出来的内精度数值也偏大,远低于优等精度的标准。这一现象也表明了自检内精度的高低实际上更取决于四个元件相对校正系数是否等于 1,比值越接近 1,内精度就越高。经与相关专家讨论认为相对标定自检方法首先是基于假设仪器探头与围岩的耦合处于理想状况时,四个元件的标定系数越接近 1 则观测数据质量越高,但也有可能部分台站台基或基岩架设条件不符合这种假设条件,雀儿沟台和新源台分量应变观测计算结果可能不能真实反映数据的观测质量,因此单从四个元件的校正系数来评判数据质量是不适宜的,还要进一步看两组面应变的拟合程度,也有可能各个台站的台基情况和观测环境的差异性影响了计算结果。

(2) 从面应变相关系数及各台站排序(图 5)来看,校正前:面应变相关性最高的为巴仑台均值达到 0.9977,其次是库米什台、榆树沟台,

榆树沟台 3 个月的面应变相关系数相差较大,其中 3 月份的系数达到 0.9986,但 2 月和 4 月都相对较低,分析认为是榆树沟台站常年受到春季的融雪干扰导致的;再次是巴音沟台,均值达到 0.9938,但巴音沟台 2 月受到仪器故障缺记的影响,面应变相关系数较低;之后排序依次是石场台、小泉沟台、雀儿沟台、新源台。其中雀儿沟台和新源台两套仪器的面应变相关系数均低于 0.9,尤其是新源台 3 个月的面应变相关系数值偏差很大,最低的为 3 月份,系数值仅为 0.0933,这与自检内精度分析计算结果是相符的。校正后,面应变相关系数最高的为榆树沟台,均值达到 0.9997;其次是巴仑台、石场台、库米什台,三套仪器的面应变相关系数校正后均大于 0.996;之后依次排序为巴音沟台、雀儿沟台、小泉沟台、新源台。从以上统计结果看,校准前后各套仪器的面应变相关系数所反映的观测数据质量排序有很大差别,同时也可以看出各套仪器校正后的面应变相关系数均大于 0.96,尤其是雀儿沟台校正前面应变相关系数均值为 0.89,校正后面应变相关系数均值提高至 0.97。这说明运用分量应变观测数据开展相关科学研究时,应首先对观测数据进行相对标定及自检分析。

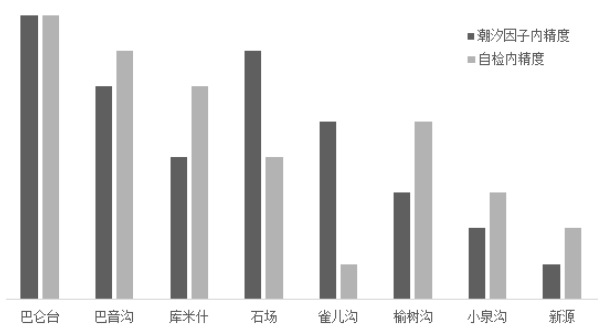


图 4 潮汐因子内精度与自检内精度排序对比

Fig.4 Comparison of internal accuracy of tidal factor and self-test

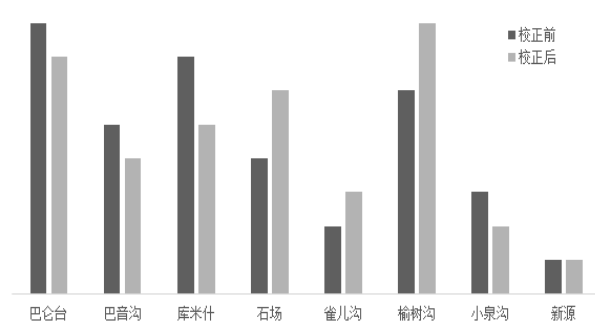


图 5 校正前后面应变相关系数排序对比

Fig.5 Comparison of the strain correlation coefficients before and after correction

(3) 选取天山中段 8 套分量钻孔应变观测数据(连续 6 个月)绘制相对校正前与校正后的两组面应变观测变化曲线(图 6)(面应变 1 对应的是 S_1+S_3 ,面应变 2 对应的是 S_2+S_4)。结合表 3 的计算结果可以看出校正后各台仪器的

面应变相关系数均大于 0.9,说明天山中段各台站的观测数据资料在研究时段内能较好地满足自检关系,符合四分量钻孔应变观测原理,观测资料质量可靠。校正后各台站两组面应变观测曲线一致性较高,尤其是榆树沟、巴仑台和

库米什三个台站的两组面应变观测曲线几乎重合在一起,也说明这三个台站的仪器观测精度较高,与上述的分析结果是一致的。同时也可以看到校正前后两组面应变观测曲线差异最明显的是新源台,校正前两组面应变观测曲线变化完全不一致,面应变1观测曲线呈阶梯状,

面应变2观测曲线平直无明显转折变化;校正后两组面应变观测曲线变化趋于一致,出现这样的变化分析认为可能是新源测点观测井灌浆后与围基岩的耦合存在一定缺陷导致的,也不排除是当地观测环境长期受到某种特定因素的影响,具体原因还有待深入探讨。

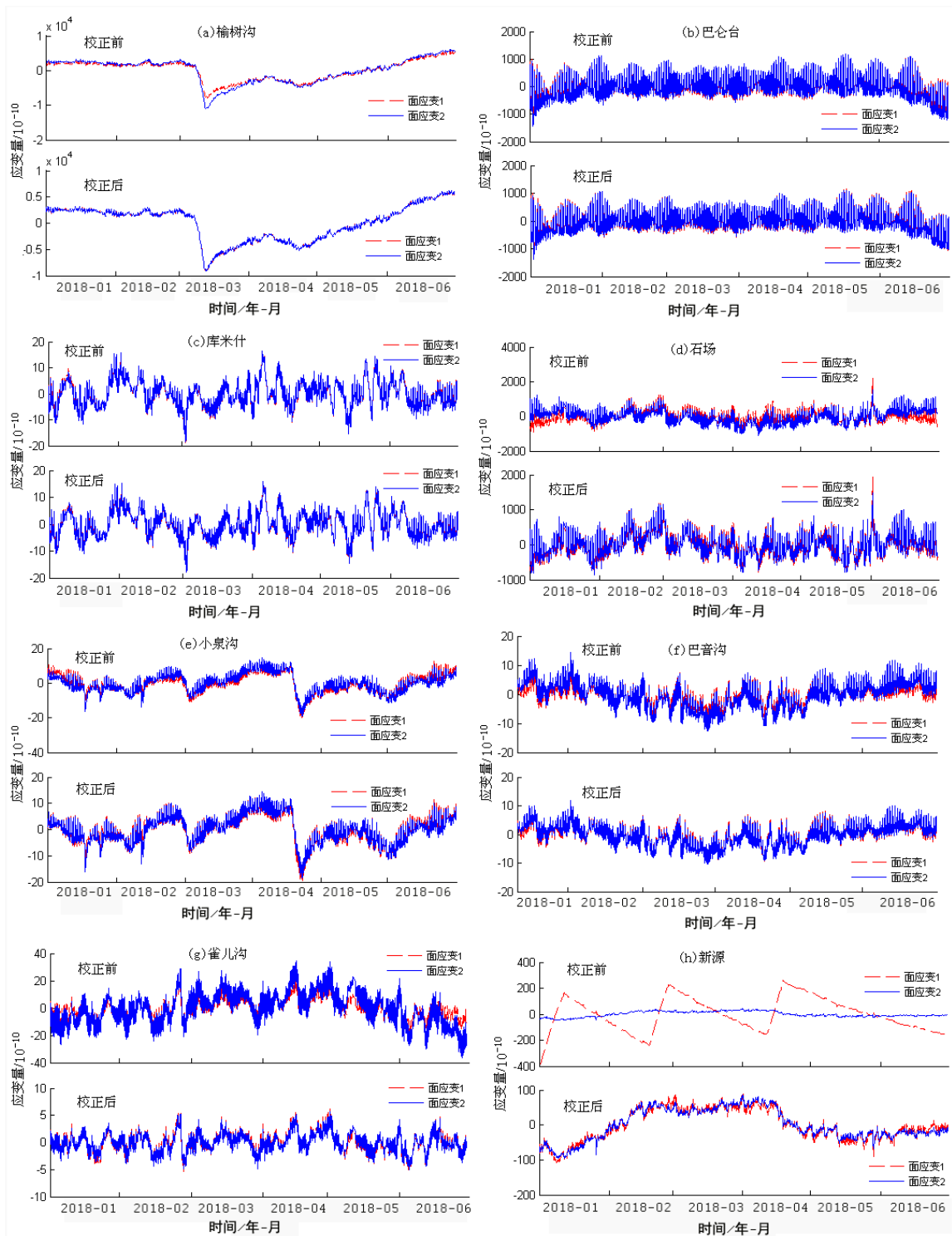


图6 钻孔应变站点校正前后的面应变变化曲线

Fig.6 Variation curve of surface strain of drilling strain site before and after correction

3 结语

本文通过计算天山中段 8 台分量钻孔应变仪的潮汐因子内精度、相对标定自检内精度及面应变相关系数，发现各台观测数据质量有一定差异性，通过相对标定后数据的精度的高低排序有明显变化，尤其是榆树沟台和雀儿沟台的数据，单从潮汐因子内精度来评判数据质量来看雀儿沟排在中上水平，但经过相对标定自检分析后雀儿沟的数据精度排名为最后；榆树沟的数据从潮汐因子内精度排名为中下，经过相对标定自检分析后数据精度上升至中上水平。校正前后各台观测数据的面应变相关系数也有明显变化，各套仪器校正后的面应变相关系数均大于 0.96，从面应变相关系数反映的数据质量排序上看榆树沟和石场的排序均有明显提高，校正后榆树沟数据质量面应变相关系数接近于 1。校正前后新源台两组面应变观测曲线变化明显，校正后两组面应变观测曲线变化趋于一致。这说明运用分量应变观测数据开展相关科学研究时，对观测数据进行相对标定及自检分析十分有必要。

从潮汐因子内精度、相对标定自检内精度及面应变相关系数三项指标综合分析认为天山中段各套分量钻孔应变观测资料均达到了国家应变台站的观测标准，观测数据质量可靠，其中观测数据精度较高的有巴仑台、榆树沟、库米什、石场，而巴音沟和雀儿沟因仪器故障、供电通讯故障等因素造成数据缺记，进而严重影响了观测数据的质量。

参考文献：

- [1] 邱泽华，张宝红. 我国钻孔应力-应变地震前兆监测台网的现状 [J]. 国际地震动态，2002 (6) : 5-9.
- [2] 邱泽华，石耀霖，欧阳祖熙. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定 [J]. 大地测量与地球动力学，2005，25 (1) : 118-122.
- [3] 唐磊，吕品姬. 钻孔四分量应变观测数据不同时间尺度的自检分析 [J]. 大地测量与地球动力学，2015，35 (3) : 525-528.
- [4] 吴立恒，李涛，陈征. 北京百善深井钻孔应变仪观测资料可靠性分析 [J]. 大地测量与地球动力学，2012，32 (3) : 41-44.
- [5] 陈涛，董蕾，唐小勇. 三峡重庆地区钻孔应变资料可靠性检验与分析 [J]. 大地测量与地球动力学，2017 (3) : 323-326.
- [6] 杨绍富. 库尔勒地震台四分量钻孔应变观测资料可靠性论证 [J]. 地震地磁观测与研究，2018，39 (02) : 136-144.
- [7] 李涛，陈群策，欧阳祖熙，等. RZB 型钻孔应变仪在青藏高原东缘地应力监测中的应用 [J]. 北京大学学报 (自然科学版)，2011，47 (4) : 677-683.
- [8] 吴云. 地形变测量 [M]. 北京：地震出版社，2008.
- [9] 唐磊，邱泽华，宋茱. 钻孔四分量应变观测自检内精度分析 [J]. 大地测量与地球动力学，2010，30 (z2) : 36-39.
- [10] 邱泽华，阚宝祥，唐磊. 四分量钻孔应变观测资料的换算和使用 [J]. 地震，2009，29 (4) : 83-89.